AUSGABE 2
SOMMER
2001

GEO MAX
NEUGIERIG AUF WISSENSCHAFT

MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Eine heiße Spur — warum Forscher Vulkane anbohren

„Hoffentlich bald wieder festen Boden unter den Füßen“ – das wünscht sich so mancher, der bei stürmischer See auf einem Segelboot ausharren muss oder mit dem Flugzeug durch ein Gewitter fliegt. Aber der Boden unter unseren Füßen ist bei weitem nicht so fest wie es scheint. Tatsächlich reißt die Erdkruste täglich an so genannten Scheitelzonen in den Ozeanbecken auf; glühend heiße Gesteinsschmelzen dringen nach oben. Die Folge: die Kontinente bewegen sich langsam voneinander weg bzw. aufeinander zu. Sichtbare Zeichen der gewaltigen Kräfte, die dabei wirken, sind Erdbeben und Vulkanausbrüche.

KONTINENTE IN BEWEGUNG

Alfred Wegener formulierte die Hypothese der **Kontinentalverschiebung** erstmals 1912. Aber die ungeheuerliche Vorstellung von wandernden Erdteilen war selbst Wissenschaftlern lange Zeit suspekt; Wegeners Theorie wurde deshalb über 50 Jahre lang regelrecht bekämpft. Einig schienen sich die Forscher nur darüber, was Vulkane *nicht* sind: Weder Goethes (1749-1832) Ansicht, sie beruhten auf Erdbränden in unendlich großen unterirdischen Kohlelagern, noch Humboldts (1769-1859) Vorstellung, sie seien Sicherheitsventile zur Entladung der über den Erdball verteilten Kräfte, waren wissenschaftlich lange haltbar.

GEOLOGEN AUF EINER REISE ZUM MITTELPUNKT DER ERDE

Erst die systematische Erforschung des Erdinneren im 20. Jahrhundert brachte Klarheit. In erster Linie lieferten seismische Messungen und die chemische Analyse von Meteoriten (die Erde entstand vor 4,5 Milliarden Jahren aus meteoritischem Material) Anhaltspunkte über den Aufbau und die Zusammensetzung des Erdballs. Danach bestehen die Erdkruste und der Erdmantel hauptsächlich aus eisen- und magnesiumhaltigen Silikaten, der Erdkern, der in rund 3000 Kilometern Tiefe beginnt, dagegen vor allem aus metallischem Eisen. Generell nehmen die Temperatur und die Dichte zum Erdmittelpunkt hin zu. Dadurch entstehen gigantische Wärme- und Materialströme sowohl im überwiegend flüssigen Kern als auch im festen Mantel. Die Forscher bezeichnen diese Umwälzungen als Konvektion und fanden darin erstmals eine plausible Erklärung für die postulierte Kontinentalverschiebung: Die Konvektion im Erdmantel ist die treibende Kraft dafür, dass sich die Kontinente verschieben. Der Durchbruch für Wegeners Theorie kam in den 60er Jahren.

Mit modernem technischen Gerät gelang es Geologen, Gesteinsproben der Ozeanböden systematisch zu untersuchen. Dabei stellten sie überrascht fest, dass diese höchstens 200 Millionen Jahre alt waren. Die kontinentale Kruste ist dagegen durchschnittlich zwei Milliarden Jahre alt. Gibt es einen Prozess, durch den sich die Ozeanböden kontinuierlich erneuerten? →

▲ Der Vulkan Kilauea auf Hawaii
(Eruption am 29.06.1983 – sie dauert heute noch an;
© NOAA National Geophysical Data Center, Boulder, USA)

Die Antwort liefert die bis heute gültige Theorie der **Plattentektonik**. Danach dringt an den mittelozeanischen Schwellen ständig Gestein aus dem Erdmantel nach oben. Die neue Erdkruste, die sich dabei bildet, wandert in Form großer Platten mit einer Geschwindigkeit von bis zu zehn Zentimetern pro Jahr wie ein Förderband nach beiden Seiten über den Erdmantel hinweg. Zwei kontinentale Platten können dabei zusammenstoßen oder sich übereinander schieben. So entstanden Gebirge wie der Himalaya. Zum Glück erweisen sich die Kontinente dabei als weitgehend stabil. Die ozeanischen Platten dagegen werden spätestens nach 200 Millionen Jahren an so genannten **Subduktionszonen** wieder vom Erdmantel verschluckt. Während nur hochpräzise Messgeräte diese unterirdischen Vorgänge registrieren können, haben sie oberirdisch sehr wohl spürbare Auswirkungen in Form von Erdbeben und Vulkanausbrüchen.

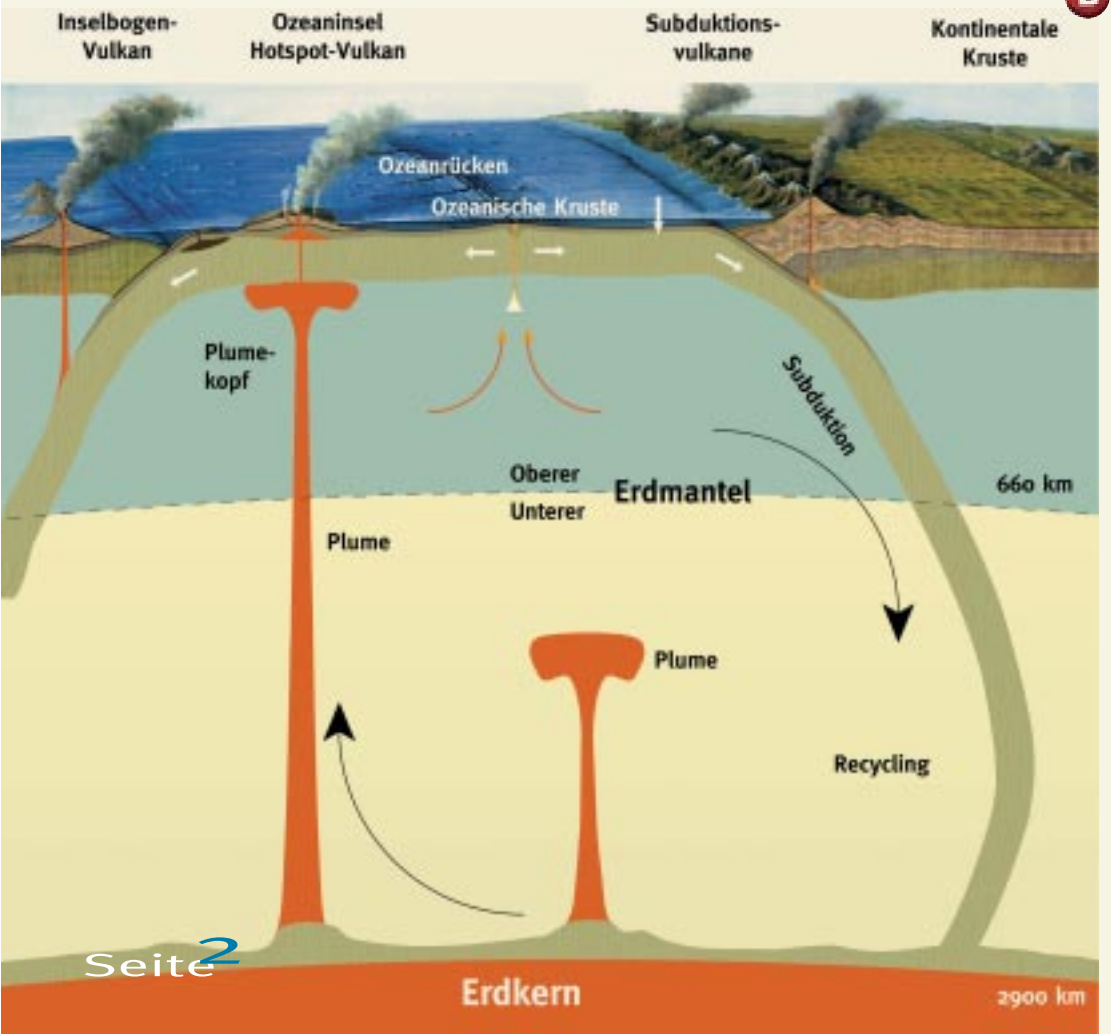
EIN SCHWEIßBRENNER LÄSST VULKANE WACHSEN

Eines der aktivsten Vulkanfelder der Erde bilden die Inseln von Hawaii. Diese entstehen durch gewaltige Eruptionen, bei denen so viel Lava nach oben geschleudert wird, dass in weniger als einer Million Jahre zum Teil Kilometer hohe Vulkankegel aus dem Ozean wachsen. Danach erlöschen die Vulkane und versinken unter ihrem eigenen Gewicht immer tiefer im Meeresboden; viele verschwinden mit der Zeit ganz unter der Wasseroberfläche. Innerhalb der letzten 70 Millionen Jahre entstand so eine etwa 7000 Kilometer lange Kette aus rund 100 Feuerbergen, von denen heute allerdings nur noch die jüngsten, z.B. die Vulkane Mauna Loa und Kilauea auf der Hauptinsel Hawaii **(Abb. A)**, aktiv sind. Da sich hier das langsame Wachsen von Vulkanen besonders gut untersuchen lässt, forschen Vulkanologen aus aller Welt in dieser Gegend, darunter auch Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Chemie in Mainz. Wie viele ihrer Kollegen fasziniert sie vor allem die Tatsache, dass die einzelnen Schlote dieser Vulkankette von Nordwesten nach Südosten immer jünger werden. Der Grund: Unter der Inselkette, etwa 100 Kilometer tief im Erdmantel, sitzt ein so genannter **Hot Spot (Abb. B)**. Wie ein gigantischer Schweißbrenner erzeugt dieser Gesteinsschmelzen, die sich durch die feste ozeanische Kruste fressen und zunächst einen „Unterwasservulkan“ **(Sea Mount)** bilden, der dann zu einer **Vulkaninsel** emporwachsen kann. Da die Erdkruste über den Erdmantel hinweg wandert, trägt sie den Vulkan jedoch von seiner Quelle fort, sodass er schließlich erkaltet. An seiner Stelle lässt der „Schweißbrenner“ wieder einen neuen Vulkan wachsen. Auf diese Weise hat der Hawaii-Hot Spot im Laufe von Jahrmillionen jene lange Insel- und Sea Mount-Kette erzeugt.

PILZE AUS HEIßEM MAGMA

Über die Ursachen von Hot Spots entwickelte der Geophysiker Jason Morgan Ende der 60er Jahre eine heute weithin anerkannte Theorie: Eine besonders heiße, aber generell feste Gesteinsschicht aus dem Erdmantel (aus einer Tiefe von wahrscheinlich 2900 Kilometern) wird instabil und quillt pilzförmig nach oben. Infolge des sinkenden Drucks nahe der Oberfläche des Erdmantels, beginnt dieser so genannte **Mantle Plume** in etwa 100 Kilometern Tiefe zu schmelzen. Die Schmelze, Magma genannt, steigt durch Risse oder selbst gebahnte Kanäle in so genannte Magmakammern in fünf bis zehn Kilometern Tiefe auf, nahe der Basis des Vulkans. In den Magmakammern beginnt das frische Mantelmagma zu kristallisieren und sich zu dem Material zu vermischen, das schließlich als Lava an die Erdoberfläche geschleudert wird. Die Wissenschaftler diskutieren dabei vor allem noch, woher das Plume-Gestein stammt. Handelt es sich um „normales“ Gestein des tiefen Erdmantels oder spielen bei der Entstehung der „Magmapilze“ komplexere geologische Prozesse eine Rolle? Eine Antwort suchen die Wissenschaftler unter anderem in einem Bohrloch, das zu den tiefsten der Welt gehört. Es entsteht zur Zeit an der Flanke des vermutlich fast erloschenen Vulkans Mauna Kea auf Hawaii. Fünf Kilometer tief will ein internationales Team unter Beteiligung des Max-Planck-Instituts für Chemie und des Geoforschungszentrums Potsdam in die bis zu mehrere hunderttausend Jahre alten Magmaschichten vordringen. Die Bohrkerne, die die Wissenschaftler dabei zutage fördern, werden vor Ort gereinigt und kleine Proben davon dann zur Analyse unter anderem in das Institut nach Mainz geschickt.

B

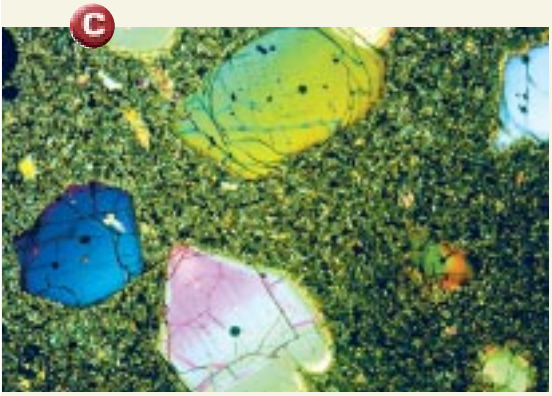


Schnitt durch die ozeanische Erdkruste und den Erdmantel.
© Max-Planck-Institut für Chemie

GEOCHEMISCHE FINGERABDRÜCKE

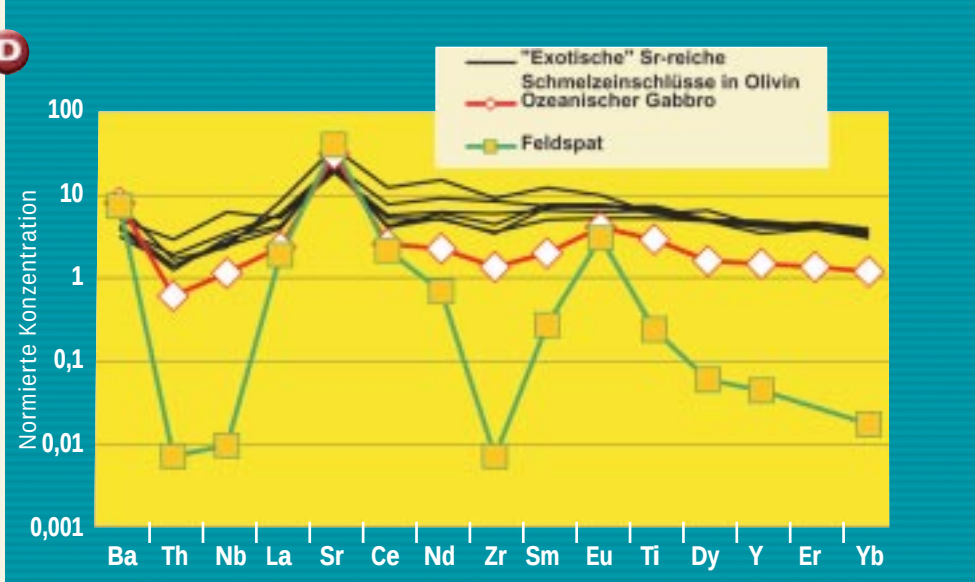
Hier werden die Bohrkerne im Gesteinsaufbereitungslabor bearbeitet **(s. a. Abb. C)**. Eine hydraulische Presse zerdrückt die Steine, spezielle Mühlen zermahlen sie dann zu feinem Pulver. Daraus bestimmen die Forscher die chemische Gesamtzusammensetzung des Gesteins. Winzige Proben des Bohrkerns landen in einem staubfreien Labor, das die Wissenschaftler nur mit Schutzkleidung durch Luftschleusen betreten. Die Mineralien werden hier in starken Säuren aufgelöst. Dann ermitteln die Forscher die Konzentration bestimmter Spurenelemente, zum Beispiel die von Barium, Rubidium, Uran oder Lanthan. Da die Konzentration einer Vielzahl von Spurenelementen in einer Gesteinsprobe mit ihrer Herkunft variiert, erhalten die Forscher für jede Probe eine ganz spezifische „Kennlinie“ **(Abb. D)** – quasi einen **„geochemischen Fingerabdruck“.** Dieser lässt sich mit bereits bekannten Kennlinien vergleichen und die Gesteinsprobe damit bestimmten Formationen zuordnen. So haben Gesteine der tiefen Ozeankruste beispielsweise eine andere Kennlinie als Gesteine, die aus dem Erdmantel stammen. Die Forscher gehen dabei vor wie Experten der Spurensicherung bei der Polizei: Diese können einen Täter ja auch anhand seines Fingerabdrucks zweifelsfrei identifizieren, vorausgesetzt dieser Fingerabdruck befindet sich bereits in der polizeilichen Datenbank. In einem für die Geowissenschaften bisher einzigartigen Projekt haben die Max-Planck-Forscher ebenfalls eine Datenbank für „geochemische Fingerabdrücke“ angelegt: die Gesteinsdatenbank GEOROC. In ihr werden die Ergebnisse der Gesteinsanalysen von Vulkanen auf der ganzen Welt zentral gespeichert. So können Wissenschaftler von überall über das Internet ihre Daten mit denen ihrer Kollegen vergleichen und damit unter anderem – genau wie die Geochemiker um Albrecht Hofmann im Fall des Mauna Loa auf Hawaii – versuchen, die Herkunft bestimmter Gesteine zu ermitteln.

C



▲ **Teile der Bohrkernproben werden in Scheiben aufgetrennt, auf eine Glasplatte geklebt und bis auf wenige hundertstel Millimeter herunter geschliffen. Die meisten Minerale (hier Hawaii-Basalt) werden dabei durchsichtig und können unter dem Mikroskop bestimmt werden.**

D



Zur Konstruktion einer Kennlinie werden die gemessenen Konzentrationen der chemischen Elemente (Horizontalachse) dividiert durch deren jeweilige Konzentrationswerte im Erdmantel. Die so normierten Werte werden durch eine Linie verbunden. Die Abbildung zeigt die „geochemischen Fingerabdrücke“ von sechs “exotischen” Strontium-reichen Schmelzeinschlüssen in Olivin aus Lava von Mauna Loa im Vergleich mit der Zusammensetzung von typischem ozeanischem Gabbro und Feldspat vom selben Gabbro.

VULKANE ALS GIGANTISCHE RECYCLING-ANLAGEN

Die sorgfältige Analyse verschiedener Hawaii-Laven zeigt, dass durch die Vulkane ein in seinem Ursprung sehr vielfältiges Gestein aus dem Erdinneren heraus geschleudert wird. So entsprechen die „geochemischen Fingerabdrücke“ von Proben des Mauna Loa und Mauna Kea dem von tiefer Ozeankruste, die hauptsächlich aus dem Mineral Feldspat besteht. Andere Vulkane werden eher aus Basalten gebildet, die aus der oberen Ozeankruste stammen. Allerdings konnten die Mainzer Forscher zeigen, dass dieses Material nicht demjenigen entspricht, das heute unter den Vulkanen liegt. Vielmehr handelt es sich um „recyceltes“ Gestein einer Ozeankruste, die wahrscheinlich vor ein bis zwei Milliarden Jahren an Subduktionszonen vom Erdmantel verschluckt wurde, lange in großen Tiefen schlummerte und dann im Schlot eines Mantle Plume wieder nach oben befördert wurde. Bereits Anfang der 80er Jahre hatte Albrecht Hofmann erste geochemische Indizien für einen solchen Prozess gefunden, jetzt, zwanzig Jahre später haben sich seine Spekulationen bestätigt: Vulkane sind Teile eines gigantischen geologischen Recyclingprozesses. Diese Forschungsergebnisse haben für großes Aufsehen gesorgt, weil sie der bisherigen Vorstellung widersprechen, nach der Magmapilze „normales“ Gestein des tiefen Erdmantels an die Erdoberfläche fördern.

VULKANAUSBRUCH AM RHEIN?

Zuhause haben die Geoforscher Gelegenheit, weniger spektakuläre aber genauso interessante Feuerberge zu studieren. Denn nordwestlich von Mainz erstrecken sich das etwa 50 Kilometer lange Westeifelvulkanfeld mit rund 240 Vulkankegeln sowie das ca. 35 Kilometer lange Osteifelvulkanfeld mit immerhin rund 100 Schloten, darunter auch der Laacher See. Wo heute Wanderer und andere Touristen eine friedliche, hügelige Landschaft genießen, brodelte vor 10 bis 40 Millionen Jahren eine Hexenküche, die typische **Intraplattenvulkane** entstehen ließ. Dabei liegen die Eifelvulkane auf einer Scholle, dem so genannten Rheinischen Schild, der sich in den vergangenen 40 Millionen Jahren zweimal hob und auch heute noch in Bewegung ist. Die Wahrscheinlichkeit, dass in der Eifel in naher Zukunft ein neuer Feuerberg entsteht, oder dass einer der schlummernden Schlote wieder ausbricht, ist zum Glück ziemlich gering. Der letzte Ausbruch vor etwa 10.000 Jahren, bei dem der Laacher See entstand, hatte allerdings verheerende Auswirkungen. Weite Teile Europas wurden damals von einer Aschenschicht bedeckt. Übrigens: Auch mit der Mainzer Datenbank konnte bisher noch kein Wissenschaftler zweifelsfrei nachweisen, wie die Vulkanfelder in der Eifel entstanden sind. Aber Forscher vermuten auch hier als Ursache einen Mantle Plume.

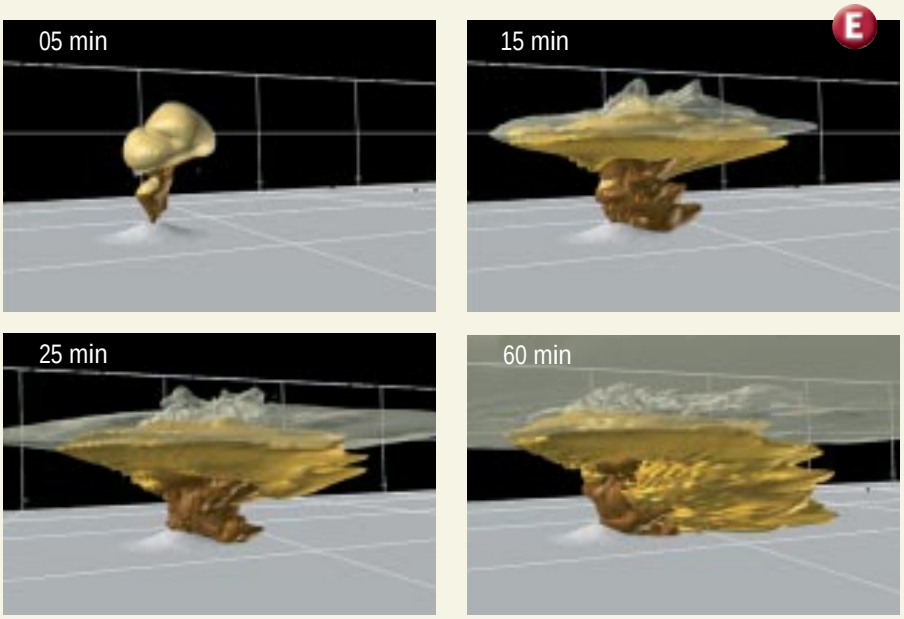
EXPLOSIONEN AM FEUERRING

Genauere Vorstellungen haben die Geologen dagegen davon, wie Vulkane entlang des „Feuerrings“ – dem Hinterland der pazifischen Anrainerstaaten und ihrer vorgelagerten Insel- →

gruppen – entstehen. Hier ereigneten sich fast alle spektakulären Ausbrüche der letzten 200 Jahre (z. B. der des Mount St. Helens, 1980, im US-amerikanischen Bundesstaat Washington, des El Chichon, 1982, in Mexiko und des Pinatubo, 1991, auf den Philippinen). Die meisten Vulkane lagen dabei dicht an der Küste eines Kontinents und entlang der Subduktionszonen, wo im übrigen auch die meisten Erdbeben entstehen. Die besonders silikathaltigen Laven von **Subduktionsvulkanen** sind zähflüssig und häufig mit Schwefeldioxid, Chlor- und Fluorwasserstoff aber auch Wasserdampf beladen. Die zunächst in der Gesteinsschmelze gelösten Gase „perlen" beim Aufstieg der Laven zur Erdoberfläche aus, ähnlich den Kohlendioxid-Bläschen bei einer frisch geöffneten Seltersflasche, mit allerdings weniger erfrischendem Ergebnis: Der hohe Innendruck der Gasblasen reicht aus, um die glühende Gesteinsmasse vor Erreichen der eigentlichen Austrittsmündung explosionsartig in kleine Lavafetzen zu zerreissen, das entstandene Gas/Feststoffgemisch auf Überschallgeschwindigkeit zu beschleunigen und kilometerhoch in die Atmosphäre zu katapultieren. Eindringendes Grund- oder Oberflächenwasser, das schlagartig verdampft und dabei ein Vielfaches seines Flüssigkeitsvolumens einnimmt, potenziert die zerstörerische Gewalt solcher Treibladungen. Die aufsteigende Eruptionssäule saugt große Mengen kalter Umgebungsluft an, die sich im Kontakt mit den heißen Förderprodukten ebenfalls erhitzt und für zusätzlichen Auftrieb sorgt. Die leichteren Aschepartikel und Gasmoleküle werden bis über 40 Kilometer hoch in die Stratosphäre transportiert und anschließend rund um den Globus verteilt.

WIE VULKANE DAS KLIMA BEEINFLUSSEN

Die meisten Menschen werden diese geballten Energien in Form eines Vulkanausbruchs wohl niemals direkt erleben. Es kann aber passieren, dass auch wir – beispielsweise als Passagiere an Bord eines Flugzeugs – die Folgen zu spüren bekommen: Auf dem Flug eines vierstrahligen Jets von London nach Tokio über Alaska kam es in einer Flughöhe von über 10.000 Metern zum Ausfall sämtlicher Triebwerke. Nach einem massiven Sinkflug gelang es dem Piloten, die Triebwerke wieder zu starten und die Maschine sicher zu landen. Passagiere und Besatzung kamen noch einmal mit dem Schrecken davon. Was war geschehen? Vulkanasche vom Ausbruch des Mount Redoubt westlich von Anchorage hatte die Drucksensoren der Turbinen außer Funktion gesetzt. Dieser dramatische Zwischenfall zeigt, wie sich jede größere Aktivität eines in die Atmosphäre eruptierenden Vulkans unvorhersehbar auf Mensch und Natur auswirken kann – insbesondere auch auf das Klima und andere meteorologische Phänomene. Während die Vulkanasche nämlich innerhalb weniger Tage wieder auf die Erde niederrieselt, wird das ebenfalls freigesetzte Schwefeldioxid (SO_2) photochemisch in der Stratosphäre oxidiert und verbindet sich dort mit Wasser zu Schwefelsäuretröpfchen (H_2SO_4). Ihre Wechselwirkung mit Sonnen- und Wärmestrahlung ändert das Klima für wenige Jahre.



▲ **Mit dem Modell ATHAM können Wissenschaftler vom Max-Planck-Institut für Meteorologie sowie vom Deutschen Klimarechenzentrum in Hamburg die Ausbreitung solcher vulkanischen Aschenwolken im Bereich von hundert Metern bis maximal hundert Kilometern simulieren.**

ASCHENREGEN ÜBER SINGAPUR

Bis zum April 1991 gehörte der Pinatubo nicht zu den häufig genannten Vulkanen der Philippinen. Man wusste nur eher vage, dass er wohl vor ungefähr 600 Jahren aktiv gewesen war. Allerdings hatte die geologische Interpretation der Ablagerungen gezeigt, dass der Pinatubo, würde er wieder ausbrechen, eine erhebliche Gefahr für die umliegenden Siedlungen darstellen könnte. Am 2. April 1991 zeigte er sein Wiedererwachen mit ersten Explosionen und Ascheneruptionen an. Über zwei Monate steigerte sich die seismische Unruhe, die vulkanischen Eruptionen und die Deformation des Vulkankegels nahmen kontinuierlich zu. Anfang Juni wurden bis zu 2000 Beben pro Tag registriert. Der Vulkan stieß jetzt täglich nahezu 5000 Tonnen Schwefeldioxid aus, die aschebeladenen Eruptionssäulen stiegen bis 8000 Meter in die Atmosphäre. Am 15. Juni teilte der vulkanologische Dienst die höchste Alarmstufe mit: Großeruption innerhalb von Stunden möglich. Eine stetige Eruptionssäule stieg bis in 40 Kilometer Höhe, Aschen fielen noch im 2500 Kilometer entfernten Singapur. Der Gipfel des Kegels wurde weggesprengt und stürzte ein...

Beobachtungen nach der Eruption zeigten: An der Erdoberfläche war die Temperatur im Mittel um 0,5°C abgekühlt; die Ozonkonzentration in der Stratosphäre war um bis zu 50% gesunken und es kam zu einer veränderten Zirkulation der Atmosphäre. Mit Hilfe von Computersimulationen **(Abb. E)** können die Wissenschaftler mittlerweile feststellen, welche Faktoren den Verlauf einer Eruption bestimmen und wie diese voneinander abhängen**.** So wurde erkannt, dass neben Zusammensetzung und Temperatur des Magmas auch die meteorologischen Umgebungsbedingungen maßgeblich für die Höhe der Eruptionssäule und die Ausbreitung von Spurenstoffen in der Atmosphäre sind.

Schlagwörter: Kontinentalverschiebung, Plattentektonik, Subduktionszonen, Hot Spot, Mantle Plume, Sea Mounts/Vulkaninseln, geochemischer Fingerabdruck, Intraplattenvulkane, Subduktionsvulkane

Lesetipps: *Vulkanismus*, Hans-Ulrich Schmincke, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 2000; *Erdbeben und Vulkane*, Rolf Schick, Verlag C.H.Beck, 1997; *Vulkane, Feuer der Erde*, Maurice Krafft, Ravensburger Taschenbuch, 1993; *Reise zum Mittelpunkt der Erde*, Jules Verne, Diogenes, 1976

Internet: http://www.geo.mtu.edu/volcanoes/
http://icdp.gfz-potsdam.de/html/hawaii/news.html

DIE „MAX"-REIHE

auch unter www.max-wissen.de – der Link zur Forschung für Schüler und Lehrer

Hier finden Sie Hintergrundinformationen und didaktisches Material zu den jeweils zweimal im Jahr erscheinenden Ausgaben von BIOMAX, GEOMAX und TECHMAX. Weitere Exemplare können Sie kostenlos bestellen bei:

Max-Planck-Gesellschaft, Referat für Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, Hofgartenstraße 8, 80539 München | e-mail: presse@gv.mpg.de | Redaktion: Dr. Christina Beck | Text: Ute Hänsler | Gestaltung: www.haak-nakat.de